УДК 621.313.333:658.562

ТЕОРИЯ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ЕЕ РАЗВИТИЕ В ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

О.П. Муравлев

Томский политехнический университет
E-mail: mop@tpu.ru

Приведены основные результаты исследований и показаны перспективы развития нетрадиционного для электромеханики направления по управлению качеством при проектировании, изготовлении и эксплуатации электрических машин. Представленный обзор научно-исследовательских работ, проводимых сотрудниками кафедры электрических машин и аппаратов в течение последних 40 лет, дает определенное понимание современных проблем электромеханики, особенно в области энергосбережения и ресурсосбережения, на решение которых направлены наши усилия.

Введение

История развития исследований в области управления качеством при проектировании, изготовлении и эксплуатации электрических машин (ЭМ) и их применения в электротехнической промышленности связана с развитием науки, техники и технологии в нашей стране. За 70 лет существования кафедры Электрических машин и аппаратов (ЭМА) ТПУ и научной деятельности на ней наблюдались периоды интенсивного роста научно-исследовательских работ, периоды стабильности и даже спада. Обычно эти циклы совпадали по времени с соответствующими периодами развития народного хозяйства. Бурное развитие научных исследований в 60-х годах прошлого столетия сопровождалось появлением новых научных школ и направлений. В это время на кафедре ЭМА возникло научное направление по проблеме обеспечения качества и надежности ЭМ.

Руководителями этого направления были утверждены заведующий кафедрой доцент Г.А. Сипайлов и доцент кафедры Э.К. Стрельбицкий. Аспиранты Ю.П. Похолков и О.П. Муравлев принимали участие с самого начала работ. Идейным вдохновителем и организатором работы был Э.К. Стрельбицкий, который возглавил ее в 1964 г. и защитил докторскую диссертацию «Исследование надежности и качества электрических машин» в 1967 г. После его отъезда из г. Томска в 1971 г. работа разделилась на два направления. Первое направление по исследованию надежности ЭМ стало выполняться на кафедре электроизоляционной и кабельной техники, и его возглавил Ю.П. Похолков, который в 1978 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка методов исследования, расчета и обеспечения показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей» в Московском энергетическом институте. Второе направление возглавил О.П. Муравлев, и в 1986 г. он защитил докторскую диссертацию «Научные основы обеспечения качества при проектировании и изготовлении низковольтных асинхронных двигателей» в Уральском политехническом институте, г. Свердловск.

На всех этапах проведения научно-исследовательских работ использовался системный подход при решении возникающих задач. Принцип системного подхода тесно связан с представлением о системе качества как о совокупности взаимосвязанных процессов. Системный подход предполагает также постоянное совершенствование системы, используя при этом измерения, оценку результатов и оптимизацию эффективности. Система управления качеством при проектировании, изготовлении и эксплуатации ЭМ является открытой и развивающейся. Улучшение ее возможно по двум направлениям:

- углубленное изучение физических процессов, происходящих в ЭМ, с использованием современных методов математического моделирования и достижений в развитии вычислительной техники;
- расширение диапазона научных интересов (ресурсосбережение и энергосбережение, связанные с проектированием, изготовлением и обеспечением работоспособности при эксплуатации ЭМ).

В результате проведенных работ создана теория точности электрических машин (ТТЭМ). На ее основе разработаны инженерные методики количественной оценки уровня качества ЭМ, расчета допусков и рассеивания показателей качества (ПК) и конструктивно-технологических факторов (КТФ).

Достоинство ТТЭМ заключается в едином подходе к оценке качества при проектировании, изготовлении и эксплуатации ЭМ [1–5].

Необходимость разработки ТТЭМ была вызвана тем, что традиционные направления научных исследований в области электромеханики не могли дать ответа на вопросы, связанные с качеством и надежностью ЭМ. Учет этих вопросов необходим, в первую очередь, для обеспечения конкурентоспособности продукции заводов нашей страны. В условиях новых экономических отношений и энергетического кризиса научно-исследовательские работы будут развиваться в направлении энергосбережения, ресурсосбережения и обеспечения современными методами работоспособности ЭМ в эксплуатации, которые тесно связаны с ТТЭМ.

Цель работ, традиционно выполняемых на кафедре ЭМА – обобщить и систематизировать результаты исследований по качеству и надежности электрических машин и определить пути их совершенствования при проектировании, изготовлении и обеспечению их эффективного использования при эксплуатации.

Эти работы проводятся на кафедре ЭМА ТПУ в течение 40 лет. Актуальность направления подтверждается поддержкой промышленности, многочисленными выступлениями на конференциях, совещаниях, включая международные. Разработана методология решения проблемы повышения и обеспечения качества и теория точности ЭМ, позволяющие подойти к оценке качества на всех стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации и создать научную основу для управления качеством [2]. Были разработаны нормативно-технические документы, которые использовались в электротехнической промышленности для совершенствования асинхронных двигателей (АД) [6–9]. Результаты работ предназначены для включения в системы автоматизированного проектирования (САПР). Перспектива развития настоящего направления связана с работами по ресурсосбережению при проектировании и изготовлении ЭМ и энергосбережению при их эксплуатации [5].

Структура научно-исследовательских работ

Систематизируя проведенные, настоящие и намеченные на ближайшую перспективу 5–10 лет НИР, можно выделить этапы:

- разработка теории точности ЭМ и использование ее для исследования энергомеханических показателей качества;
- расширение зоны применения ТТЭМ и системного подхода к обеспечению показателей качества АД и других типов ЭМ;
- НИР по энергосбережению и ресурсосбережению при проектировании, изготовлении и эксплуатации различных типов электрических машин.

Структурная иерархическая схема НИР приведена на рисунке. Первые два уровня описаны на рисунке. Третий уровень описан ниже.

1. Теория точности электрических машин и ее применение для асинхронных двигателей

1.1.1. Расчет допусков энергомеханических показателей качества.

1.1.2. Оценка технического уровня при проектировании АД по обобщенному показателю качества.

1.1.3. Установление номинальных значений показателей качества.

1.1.4. Модели поискового и нормативного прогнозирования для определения технического уровня ЭМ.

1.2.1. Банк данных технологических погрешностей показателей качества и конструктивно-технологических факторов.

1.2.2. Методы обеспечения надежности АД при изготовлении.

1.2.3. Совершенствование системы контроля.

1.2.4. Имитационная модель технологического процесса изготовления АД, учитывающая точностные возможности процессов и точность контроля.

1.2.5. Расчет полей рассеивания и конструктивно-технологических факторов

1.2.6. Математическая модель определения энергомеханических показателей качества АД по результатам приемо-сдаточных испытаний.

1.2.7. Комплекс мероприятий для изготовления АД повышенной надежности.

1.3.1. Рассеивание параметров защиты АД при эксплуатации.

1.3.2. Выбор системы защиты при эксплуатации с учетом рассеивания параметров двигателя и защиты.

1.3.3. Оптимизация надежности при эксплуатации по экономическим критериям.

2. Расширение зоны применения ТТЭМ

2.1.1. Ресурсосбережение при проектировании и изготовлении АД.

2.1.2. Моделирование технологического процесса изготовления АД на ПЭВМ.

2.1.3. Создание подсистем САПР.

2.1.4. Исследование виброакустических характеристик АД (шум и вибрация).

2.1.5. Разработка подсистемы САПР для модернизации асинхронных двигателей.

2.2.1. Электромагнитная совместимость машин постоянного тока с радиоэлектронными системами.

2.3.1. Выбор генераторов для автономных ветроэнергетических установок.

2.3.2. Моделирование режимов работы асинхронных и синхронных генераторов для автономных энергоустановок.

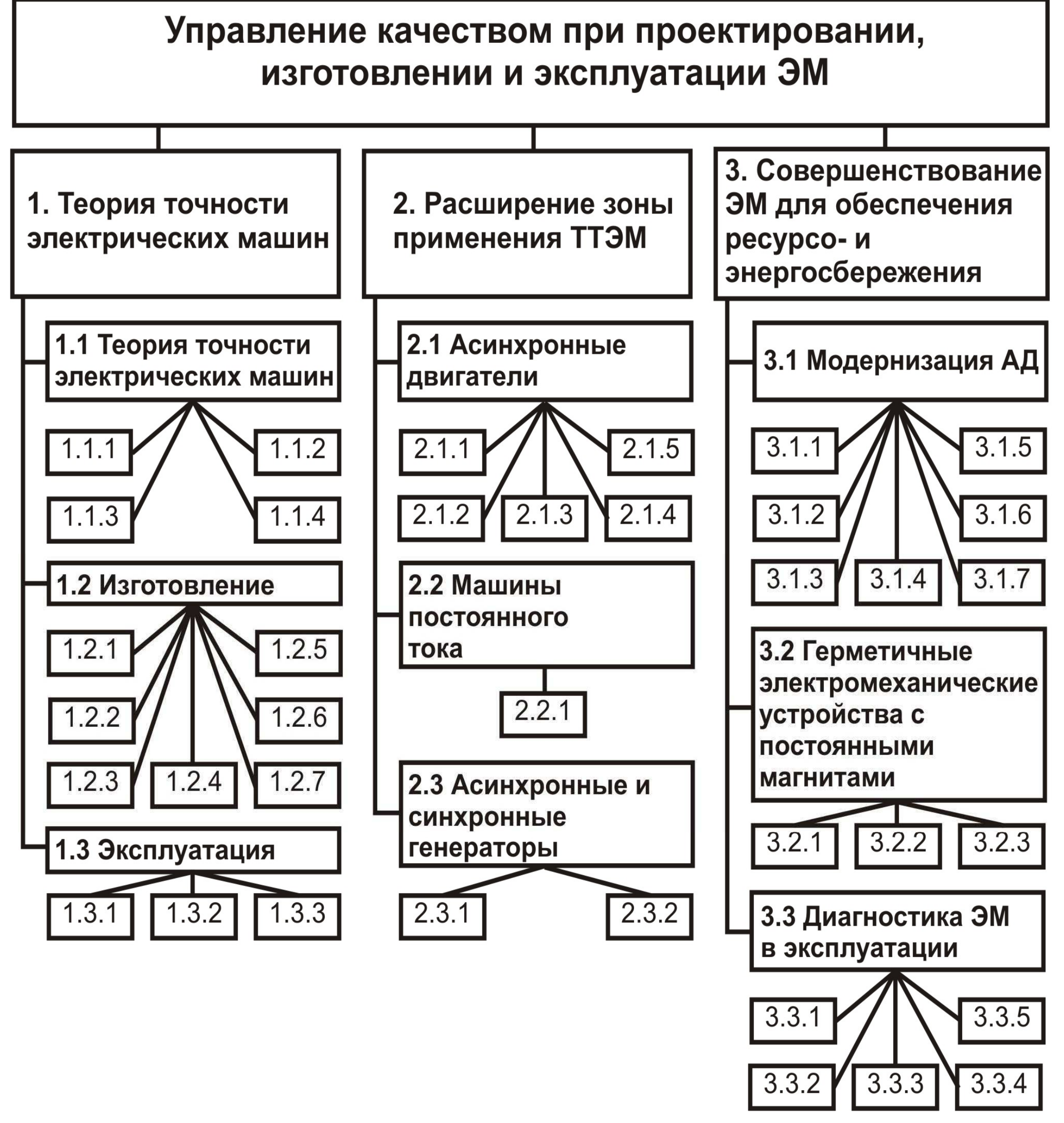


Рисунок. *Структура научно-исследовательских работ по управлению качеством при проектировании, изготовлении и эксплуатации электрических машин*

3. Совершенствование электрических машин для обеспечения энергосбережения и ресурсосбережения

3.1.1. Разработка и исследование специализированных АД для энергосберегающих технологий.

3.1.2. Разработка многофазных АД для регулируемого электропривода.

3.1.3. Модернизация крановых АД и совершенствование их электромагнитных и тепловых расчетов.

3.1.4. Математическое моделирование АД в составе регулируемого электропривода.

3.1.5. Моделирование переходных процессов.

3.1.6. Выбор методов оптимизации при проектировании электромеханических устройств.

3.2.1. Электромагнитные муфты для погружных электродвигателей.

3.2.2. Синхронные генераторы для электропитания скважинных приборов.

3.2.3. Герметичные синхронные двигатели с постоянными магнитами.

3.3.1. Вибродиагностика ЭМ переменного тока в эксплуатации.

3.3.2. Диагностика обмоток ЭМ переменного тока в эксплуатации.

3.3.3. Мониторинг ЭМ переменного тока в эксплуатации.

3.3.4. Совершенствование системы ремонта ЭМ переменного тока в эксплуатации.

3.3.5. Экономическое обоснование внедрения систем диагностики и мониторинга при эксплуатации электрических машин.

1. Теория точности электрических машин и ее применение для асинхронных двигателей

Для решения проблемы обеспечения и повышения качества ЭМ и асинхронных двигателей, в первую очередь, были созданы методология и научная основа оценки показателей качества, разработана теория точности электрических машин (ТТЭМ) и комплекс математических моделей (ММ) для ее реализации. Этот комплекс включает три типа моделей:

- структурная модель, которая позволяет реализовать системный подход к управлению качеством, установить набор и взаимосвязь элементов, определяющих качество, и оценить относительную важность отдельных элементов и параметров для обеспечения качества [1, 5];
- стохастическая модель с детерминированными операторами для количественной оценки системы формирования качества при проектировании и изготовлении АД [1, 2];
- имитационная модель для моделирования и оптимизации технологических и контрольных операций на ПЭВМ [10, 11].

Описание формирования качества сделано на основе стохастической модели с детерминированными операторами, которая является основой теория точности электрических машин (ТТЭМ) [1–3, 5]. Выходные параметры – показатели качества (ПК) ЭМ: коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, пусковой и максимальный моменты, пусковой ток, превышение температуры различных частей ЭМ и т.п. Входные параметры – конструктивно-технологические факторы (КТФ): основные и локальные размеры, характеристики применяемых материалов – длины сердечников, величина воздушного зазора, удельное сопротивление алюминия для обмотки ротора, удельные потери в стали сердечников и т.п. Выходные и входные параметры связаны выражением

$$y_i=f_i(x_1,\ldots,x_j,\ldots,x_m). \qquad (1)$$

Модель формирования качества целесообразно строить не для абсолютных значений ПК и КТФ, а для отклонений от средних значений или математических ожиданий. При разработке модели приняты следующие допущения:

- показатели качества ЭМ являются непрерывными функциями от КТФ;
- значения ПК и КТФ – случайные величины;
- изменение ПК допускается только в определенных односторонних или двухсторонних пределах, установленных стандартами.

В матричной форме модель имеет вид:

$$\Delta Y = C_о + C\Delta X, \qquad (2)$$

где $C_о$ – матрица-столбец, элементы которой характеризуют систематические погрешности; ΔX, ΔY – столбцовые матрицы, элементами которых являются погрешности КТФ и единичных ПК; C – матрица передаточных коэффициентов (детерминированных операторов) преобразующей системы, которая определяет влияние того или иного фактора на суммарную погрешность единичных ПК.

Применяя теорему о числовых характеристиках линейной функции нескольких взаимно независимых случайных аргументов и учитывая зависимости (1) и (2), получаем математические ожидания и дисперсию погрешностей единичных ПК:

$$M_{\Delta Y} = C_о + CM_{\Delta X}, \qquad (3)$$

$$D_{\Delta Y} = FD_{\Delta X}, \qquad (4)$$

где $M_{\Delta Y}$, $M_{\Delta X}$, $D_{\Delta Y}$, $D_{\Delta X}$, – матрицы-столбцы, элементами которых являются математические ожидания и дисперсии ПК и факторов; F – матрица преобразования дисперсий факторов в дисперсии ПК $f_{\gamma j}=C^2_{\gamma j}$.

Решение прикладных задач обеспечения качества при проектировании и изготовлении ЭМ связано с полями допусков и полями рассеивания ПК и КТФ. Эти поля являются случайными величинами. Для однозначности определения рассеивания случайной величины, поля допуска и номинального значения параметра приняты следующие обозначения с учетом существующих ГОСТов: $x_н$, $\overline{x}$ – номинальное и среднее значения параметров; e_i, e_s – нижнее и верхнее предельные отклонения; x_i, x_s – значение величины параметра, соответствующее нижней и верхней границам поля допуска; t – поле допуска; x_i^* –предельное наименьшее значение параметра, при котором вероятность появления значений $x<x_i^*$ меньше или равна некоторой допустимой вероятности $P_{iдоп}$, т.е. $P\{x<x_i^*\}<P_{iдоп}$, x_s^* –предельное наибольшее значение параметра, при котором вероятность появления значений $x>x_s^*$ – меньше или равна некоторой допустимой вероятности $P_{sдоп}$, т.е. $P\{x>x_s^*\}<P_{sдоп}$; $\ell=x_s^*-x_i^*$ – предельное поле рассеивания параметров x; x_ℓ – значение параметра, соответствующее середине поля рассеивания; P_i; (P_s) – вероятность выхода параметров за нижнюю (верхнюю) границу поля допуска.

На основе ММ расчета рассеивания и допусков показателей качества при проектировании и изготовлении асинхронных двигателей разработаны методики расчета допусков и рассеивания ПК АД. Расчет допусков производится вероятностным методом. Для проведения расчетов необходимо знать допуски t_{xj} или поля рассеивания ℓ_{xj} соответствующих факторов и коэффициенты влияния $C_{\gamma j}$. Величины t_{xj} определяются нормативно-технической документацией, а ℓ_{xj} – точностными возможностями технологических процессов (ТП). Коэффициенты влияния могут быть рассчитаны различными методами. При применении ПЭВМ их целесообразно определять численным методом. Значения коэффициентов K_{xj} и K_{yj} выбираются в зависимости от допустимой доли выхода за пределы допуска, наличия контроля и точности измерительных устройств. В таблице приведены поля рассеивания конструктивно-технологических факторов [2].

Поверочный расчет допусков имеет целью по заданным допускам или полям рассеивания на факторы определить поля рассеивания единичных ПК. Система уравнений для расчета допусков вероятностным методом, полученная на основании (3) и (4):

$$\begin{aligned}
&t_{y1}^2 K_{y1}^2 = C_{11}^2 K_{x1}^2 t_{x1}^2 + C_{12}^2 K_{x2}^2 t_{x2}^2 + \ldots + C_{1j}^2 K_{xj}^2 t_{xj}^2 + \ldots + C_{1n}^2 K_{xn}^2 t_{xn}^2 \\
&t_{y2}^2 K_{y2}^2 = C_{21}^2 K_{x1}^2 t_{x1}^2 + C_{22}^2 K_{x2}^2 t_{x2}^2 + \ldots + C_{2j}^2 K_{xj}^2 t_{xj}^2 + \ldots + C_{2n}^2 K_{xn}^2 t_{xn}^2 \\
&\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \\
&t_{y\gamma}^2 K_{y\gamma}^2 = C_{\gamma 1}^2 K_{x1}^2 t_{x1}^2 + C_{\gamma 2}^2 K_{x2}^2 t_{x2}^2 + \ldots + C_{\gamma j}^2 K_{xj}^2 + \ldots + C_{\gamma n}^2 K_{xn}^2 t_{xn}^2 \\
&\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \\
&t_{ym}^2 K_{ym}^2 = C_{m1}^2 K_{x1}^2 t_{x1}^2 + C_{m21}^2 K_{x21}^2 t_{x2}^2 + \ldots + C_{mj}^2 K_{xj}^2 + \ldots + C_{mn}^2 K_{xn}^2 t_{xn}^2
\end{aligned} \qquad (5)$$

система уравнений для расчета полей рассеивания ПК

$$\begin{aligned}
&\ell_{y1}^2 = C_{11}^2 \ell_{x1}^2 + C_{12}^2 \ell_{x2}^2 + \ldots + C_{1j}^2 \ell_{xj}^2 + \ldots + C_{1n}^2 \ell_{xn}^2 \\
&\ell_{y2}^2 = C_{21}^2 \ell_{x1}^2 + C_{22}^2 \ell_{x2}^2 + \ldots + C_{2j}^2 \ell_{xj}^2 + \ldots + C_{2n}^2 \ell_{xn}^2 \\
&\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \\
&\ell_{y\gamma}^2 = C_{\gamma 1}^2 \ell_{x1}^2 + C_{\gamma 2}^2 \ell_{x2}^2 + \ldots + C_{\gamma j}^2 \ell_{xj}^2 + \ldots + C_{\gamma n}^2 \ell_{xn}^2 \\
&\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \\
&\ell_{ym}^2 = C_{m1}^2 \ell_{x1}^2 + C_{m2}^2 \ell_{x2}^2 + \ldots + C_{mj}^2 \ell_{xj}^2 + \ldots + C_{mn}^2 \ell_{xn}^2
\end{aligned} \qquad (6)$$

и отклонение средних от номинальных или расчетных значений

$$\begin{aligned}
&\Delta y_1 = C_{11}\Delta x_1 + C_{12}\Delta x_2 + \ldots + C_{1j}\Delta x_j + \ldots + C_{1n}\Delta x_n \\
&\Delta y_2 = C_{21}\Delta x_1 + C_{22}\Delta x_2 + \ldots + C_{2j}\Delta x_j + \ldots + C_{2n}\Delta x_n \\
&\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \\
&\Delta y_\gamma = C_{\gamma 1}\Delta x_1 + C_{\gamma 2}\Delta x_2 + \ldots + C_{\gamma j}\Delta x_j + \ldots + C_{\gamma n}\Delta x_n \\
&\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \\
&\Delta y_m = C_{m1}\Delta x_1 + C_{m2}\Delta x_2 + \ldots + C_{mj}\Delta x_j + \ldots + C_{mn}\Delta x_n .
\end{aligned} \qquad (7)$$

Таблица. *Поля рассеивания конструктивно-технологических факторов*

КТФ	w_1	$d_{пр}$	l_m	r_1	ρ_{Al}	l_1	l_2	$2p=2$	$2p=4$	$p_{см}$
$0{,}5\ell_{xy}^2$, %	0...2	1,5...3,4	0,8...1,2	4...10	25...36	1,6	1,3	12...15	14...22	16–52
Δx_j	0	0...2	0	0...4	4...9	0	0	0	0	0

Обозначения: w_1, r_1, l_m, $d_{пр}$ – число витков, активное сопротивление, средняя длина витка и диаметр провода обмотки статора; ρ_{Al} – удельное электрическое сопротивление обмотки ротора; l_1 и l_2 – длины сердечников статора и ротора; δ – величина воздушного зазора; $p_{см}$ – сумма потерь в стали и механических; 2p – число полюсов

Для проверки методики расчета допусков было рассчитано большое количество вариантов, результаты которых сопоставлялись с экспериментальными данными для АД серий А, АО, АО2, ВАО, АР, 4А, 5А и АИР. Максимальная погрешность расчета допусков и рассеивания не превышает 15 %, а отклонений – 5 %. По результатам поверочного расчета можно судить о соответствии полей рассеивания ПК допускам по ГОСТ 183-74 и выделить наиболее существенные факторы, которыми для АД являются удельное сопротивление обмотки ротора, величина воздушного зазора, потери в стали и механические. На основании разработанной ММ можно определить вероятность выпуска бракованных АД при установленных стандартами номинальных значениях и допусках для ПК и существующих точностных возможностях ТП. На основе проведенных теоретических исследований произведена количественная оценка влияния контроля на показатели качества. Рассеивание факторов существенно уменьшается после контроля и зависит от точности измерений, появляется возможность улучшения номинальных значений ПК и коэффициента технического контроля. Учет влияния контроля позволяет повысить точность расчета допусков на 3...22 %. Предложена методика установления номинальных значений ПК. ММ расчета рассеивания и допусков показателей качества при проектировании и изготовлении асинхронных двигателей (5–7) позволяет рассчитывать допуски на ПК и поля рассеивания. Эта ММ предназначена для включения в САПР АД.

Большое внимание к проблеме обеспечения качества во всем мире обусловлено объективной закономерностью технического прогресса. Количество и качество выпускаемой продукции зависит от уровня развития производительных сил в стране. При недостаточном развитии производительных сил вопросы качества остаются на втором месте. По мере их развития соотношение между количеством и качеством выпускаемой продукции изменяется в пользу качества, и проблема качества приобретает первостепенное значение. В настоящее время эти изменения хорошо видны, а в начале работ по этой тематике не было моделей процесса формирования качества ЭМ, которые позволили бы количественно оценить качество. Под руководством Э.К. Стрельбицкого были разработаны основные принципы создания математических моделей по качеству и надежности ЭМ. В этот период работало первое поколение его учеников: Ю.П. Похолков, О.П. Муравлев, А.Я. Цирулик, А.С. Гитман, Ю.М. Башагуров. Следует отметить, что каждый из перечисленных сотрудников после выполнения кандидатских диссертаций имел перспективное направление и тему докторской диссертации, но реализовали возможность защиты следующей диссертации только двое.

Развитие во времени этого научного направления можно проследить по защищенным диссертациям. Первой в 1966 г. была защищена кандидатская диссертация О.П. Муравлевым «Исследование влияния точностных характеристик техпроцесса на качество и надежность асинхронных двигателей», которая стала базовой для последующих работ. Исследованием стабильности технологических процессов и вопросами обеспечения качества при изготовлении асинхронных двигателей общепромышленного применения занимался А.Д. Немцев (1972 г.), который впервые предложил количественную оценку качества технологических процессов. Разработке и исследованию методов контроля качества взрывозащищенных трехфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей посвящена работа Ю.М. Гринберга (1972 г.). Он провел большую работу по оценке точности изготовления на заводе «Кузбассэлектромотор», г. Кемерово. Асинхронные рольганговые двигатели выпускались только в г. Томске на заводе «Сибэлектромотор», а применялись как в Советском Союзе, так и во всех странах народной демократии, Индии, Турции и других странах. Их исследованием занимал-

ся В.В. Днепровский (1973 г.). Он провел анализ технических характеристик рольганговых АД, исследовал чувствительность ПК к технологическим отклонениям, определил точностные показатели технологических процессов для этих двигателей, предложил методики расчета допусков на ПК и выбора номинальных значений параметров. Результаты его работы используются для модернизации рольганговых двигателей и в настоящее время.

Разработка теоретических основ прогнозирования ПК и технического уровня АД при неполном знании исходной информации, создание модели поискового прогнозирования перспективных конструкций и модели нормативного прогнозирования для обеспечения заданного технического уровня представлены в работах О.Л. Рапопорта (1974 г.) и В.М. Педикова (1983 г.). ММ применяются для прогнозирования свойств материалов для АД.

С 1976 г., начиная с работ Н.А. Жукова, В.М. Игнатовича, О.Г. Онученко, для решения проблемы обеспечения качества стали применять системный подход, который позволил систематизировать предыдущие работы, установить иерархию и набор элементов и параметров, определяющих ПК АД и определить все взаимосвязи между ними. Эти работы, как и последующие характерны тем, что на их основе разрабатываются нормативно-технические документы, которые использовались на заводах электротехнической промышленности СССР. Среди разработанных документов следует отметить отраслевой стандарт ОСТ 16.0.801.164-84 «Отраслевая система управления качеством двигателей асинхронных синхронных свыше 56 до 355 габарита включительно» [6–9]. Результаты исследования актуальны и для современной сертификации качества по международным стандартам.

Кроме АД, были проведены исследования по машинам постоянного тока. А.П. Муравлев в 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование влияния технологических погрешностей на качество двигателей постоянного тока» и А.Н. Селяев – «Разработка и исследование способов снижения радиопомех в машинах малой мощности», по тематике которой им в 2001 г. защищена и докторская диссертация.

Не потеряла интереса работа Т.С. Шелеховой (1984 г.) «Обеспечение качества при производстве и эксплуатации асинхронных рольганговых двигателей», в которой наряду со специфическими вопросами эксплуатации асинхронных рольганговых двигателей разработаны математическая модель изготовления сердечников статоров АД и методика расчета границ регулирования для контроля электромагнитных характеристик сердечников статоров с учетом экономической эффективности при эксплуатации АД. По результатам исследования разработана и внедрена в СКБ ПО «Сибэлектромотор» установка для определения качества сердечников статоров, предназначенная для контроля сердечников статоров в процессе серийного производства. Применение этой установки актуально и в наши дни, когда необходимо снизить рассеивание потерь сердечника статора для снижения материалоемкости при проектировании и изготовлении АД.

Элементы контроля при изготовлении АД вошли составной частью в ряд диссертаций (А.Д. Немцев, Ю.М. Гринберг, В.М. Игнатович, Т.С. Шелехова), но наиболее глубокие исследования по вопросам контроля провела О.Ф. Шапкина, защитившая диссертацию «Влияние контроля на формирование качества при изготовлении асинхронных двигателей» в 1984 г. Она построила иерархическую модель системы обеспечения качества при контроле в процессе производства АД, которая охватывает все этапы – от контроля качества материалов и комплектующих до испытаний готовых двигателей; создала имитационную модель технологического процесса, на основании которой разработана инженерная методика выбора оптимальных характеристик контроля для обеспечения заданного качества, и предложила метод учета влияния контроля на рассеивание ПК и КТФ [11].

Завершающей работой в первом периоде стала работа В.И. Кувайцева «Оценка влияния технологических погрешностей на эксплуатационную надежность низковольтных асинхронных двигателей». В этой работе исследовано влияние технологических погрешностей изготовления на эксплуатационную надежность асинхронных двигателей и разработаны научно-обоснованные рекомендации для обеспечения заданных показателей надежности в процессе эксплуатации. Впервые предложено учитывать рассеивание параметров АД, критичных к аварийным режимам и рассеивание параметров устройств защиты. Обобщение результатов проведенных исследований было сделано в докторской диссертации, которую автор защитил в 1986 г. [2].

Заключение

Проведенные исследования позволили обосновать решение проблемы повышения и обеспечения качества электрических машин, которое заключается в создании методологии, в системном подходе, разработке точности ЭМ, оценке качества с единых позиций точности при проектировании и изготовлении. Реализация рекомендаций способствует комплексному решению проблемы качества асинхронных двигателей при их проектировании и изготовлении, когда традиционные пути совершенствования АД практически исчерпаны. Результаты этой работы актуальны в настоящее время при сертификации качества при изготовлении электрических машин.

Теория точности электрических машин и комплекс математических моделей, состоящий из структурной модели, реализующей системный подход и устанавливающей набор и взаимосвязь элементов, определяющих качество, стохастической модели с детерминированными операторами для количественной оценки системы формирования качества при проектировании и изготовлении АД и имитационной модели для моделирования и оптимизации техноло-

гических и контрольных операций могут применяться для любых типов электрических машин.

Впервые систематизированы и обобщены данные по рассеиванию показателей качества и конструктивно-технологических факторов, их определяющих, за последние 40 лет для асинхронных двигателей мощностью 1...30 кВт. За этот период рассеивание показателей качества почти не изменилось, но средние значения приблизились к каталожным, что отражает систематическое снижение запасов. Полученные результаты необходимы при разработке САПР электрических машин.

Научные сотрудники, защитившие диссертации по этому направлению, в настоящее время работают в различных городах России, ближнем и дальнем зарубежье. Большая часть трудится в г. Томске: доцент О.Л. Рапопорт заведует кафедрой «Электрические машины и аппараты» в нашем университете, на этой же кафедре работают автор статьи и доцент В.М. Игнатович; в ТГАСУ – доценты В.М. Педиков, Т.С. Шелехова и в ФГУП «ПОЛЮС» – главный специалист, д.т.н. А.Н. Селяев. В различных городах России работают: д.э.н. А.Д. Немцев – г. Тольятти, В.И. Кувайцев – г. Оренбург, О.Ф. Шапкина и Т.Д. Карминская – г. Ханты-Мансийск, Н.А. Жуков и О.Г. Онученко – г. Владимир. За границей: В.В. Днепровский – на Украине, А.Г. Вэрэш – в Эстонии, Ю.М. Гринберг в Израиле и Д.И. Чащин – в Австралии. Профессиональные достижения, рост квалификации, служебные продвижения, круг решаемых проблем, адаптация к новым условиям деятельности подтверждают высокий уровень выпускника нашего университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравлев О.П. Разработка теории и практических методов управления качеством электрических машин // Электричество. – 1986. – № 4. – С. 29–32.
2. Муравлев О.П. Научные основы обеспечения качества при проектировании и изготовлении низковольтных асинхронных двигателей: Автореф. дис. ... д.т.н. – Свердловск: УПИ, 1986. – 40 с.
3. Муравлев О.П., Стрельбицкий Э.К. Обеспечение необходимой точности при производстве асинхронных двигателей // Электротехника. – 1966. – № 7. – С. 21–23.
4. Муравлев О.П., Стрельбицкий Э.К. Расчет допусков на параметры асинхронных двигателей // Электротехника. – 1968. – № 11. – С. 55–57.
5. Муравлев О.П., Муравлева О.О. Теория точности и ее использование для ресурсосбережения при проектировании и изготовлении электрических машин // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 1. – С. 152–157.
6. Жуков Н.А., Игнатович В.М., Муравлев А.П., Муравлев О.П. Системный подход к управлению качеством при изготовлении асинхронных двигателей // Электротехника. – 1976. – № 10. – С. 52–54.
7. Жуков Н.А., Игнатович В.М., Муравлев О.П. Управление качеством при изготовлении асинхронных двигателей // Надежность и контроль качества. – 1977. – № 3. – С. 3–10.
8. Онученко О.Г., Малков Г.А., Жуков Н.А., Муравлев О.П. Методика оценки качества изготовления трехфазных асинхронных двигателей // Электротехника. – 1980. – № 8. – С. 57–61.
9. Муравлев О.П. Системный подход к оценке качества при проектировании и изготовлении электрических машин // Надежность и контроль качества. – 1983. – № 10. – С. 30–36.
10. Муравлев О.П., Чащин Д.И. Оценка и прогнозирование состояния подшипниковых узлов асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Надежность и контроль качества. – 1987. – № 2. – С. 33–36.
11. Муравлев О.П., Шапкина О.Ф. Имитационная модель технологического процесса изготовления асинхронных двигателей // Известия вузов. Электромеханика. – 1987. – № 12. – С. 33–39.